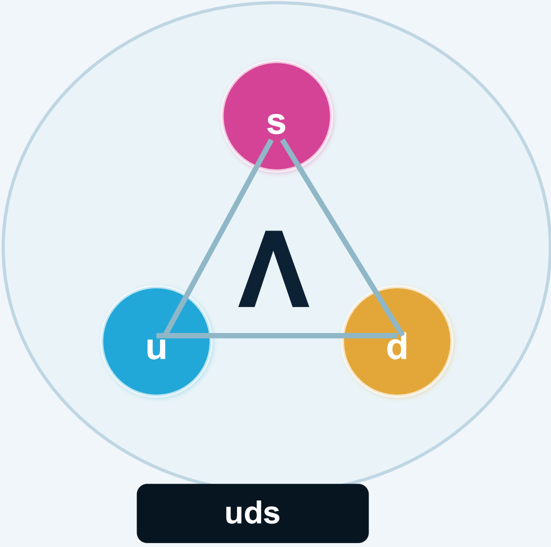
Λ 部分子光锥分布振幅的格点计算

Complete leading-twist Λ-baryon LCDAs from lattice QCD

超子–核子谱仪物理研讨会 南开大学 2026/08/16

华俊 · 华南师范大学
On behalf of the Lattice Parton Collaboration

为什么是 Λ? 一个奇异重子实验室



最轻奇异重子

isosinglet 轻夸克对 + strange valence quark

同一个强子同时连接
polarization · form factors · CP/EDM

Λ → p π⁻ 遍举弱衰变

$\Lambda \to p\pi^-$ 的角分布直接分析 Λ 极化，并提供离散对称性检验。

s 奇异味结构标杆

最简单的 uds 系统之一，可研究轻夸克对与 s 夸克之间的动量分配。

电磁结构

精确的 time-like form factors 正在提高对 Λ 内部结构的分辨能力。

EDM / CP 探针

Λ EDM 对 CP-odd quark dipoles，尤其 strange-quark CEDM，提供互补灵敏度。

为什么是现在？超子精密物理进入新阶段

实验端的进展，正在把“缺少受控强子结构输入”变成主要瓶颈。

1956

宇称破坏与自分析衰变

Λ 弱衰变成为极化与离散对称性研究的经典入口。

L&Y, PR 104 254(1956)

2019

量子纠缠 $\Lambda\bar{\Lambda}$

纠缠重子对使极化和 spin-correlation 的完整分析成为可能。

BESIII, Nature 15 631 (2019)

2025

重子 CPV 与精密 form factors

b-baryon CP violation 的首次观测与 Λ time-like form-factor 进展。

LHCb, Nature 643 8074 (2025)
LHCb, PRL 134 101802 (2025)

2025–26

Λ EDM 灵敏度跃升

BESIII 结果与 pQCD 分析把 hyperon EDM 推向夸克偶极约束。

BESIII, arXiv:2506.19180
Chen et al., PRL136,051902(2026)

实验已经能更精细地问问题；理论需要提供完整、可卷积、带误差的 Λ 三夸克结构。

实验测什么？理论还缺什么？

观测量

角分布
极化与自旋关联
截面与 form factors

强子响应

电磁 form factors
弱衰变振幅
CP-odd EDM form factor

QCD 因子化

短距离 hard kernel 与非微扰三夸克结构进行卷积

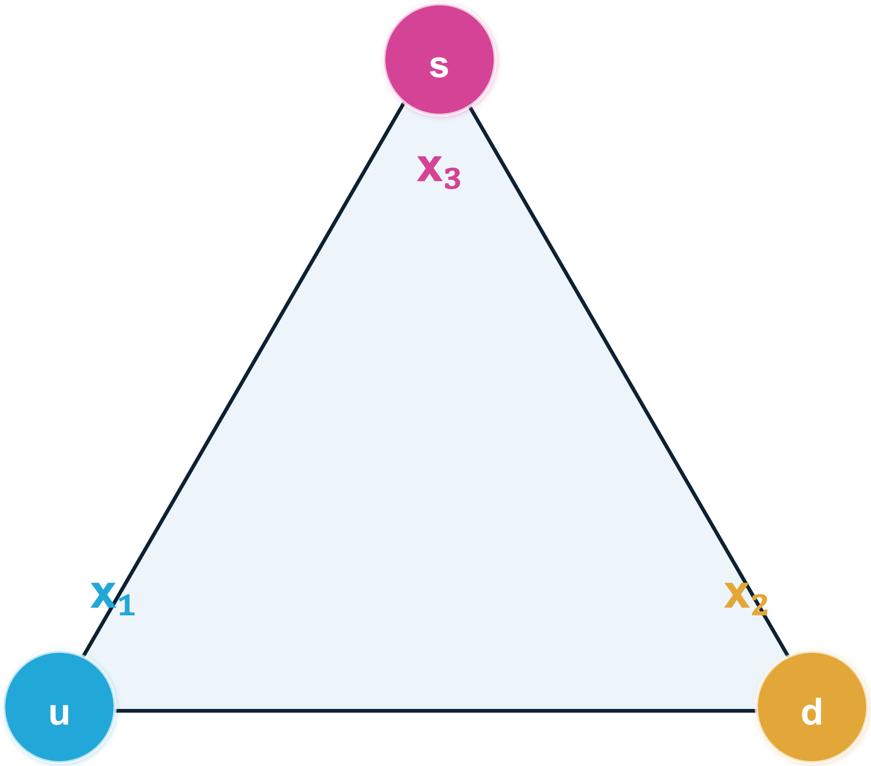
关键非微扰输入：Λ LCDA

决定 u、d、s 的纵向动量与螺旋度权重，并把夸克层面的作用量映射到可测强子量。

这正是格点 QCD 需要补上的“翻译层”

LCDA 不是额外的模型参数；它是从夸克算符到谱仪观测量的非微扰传递函数。

LCDA：Λ 的三夸克纵向动量图像



$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

物理支撑区域是一块二维三角形，而不是一条一维线

三种 leading-twist 结构

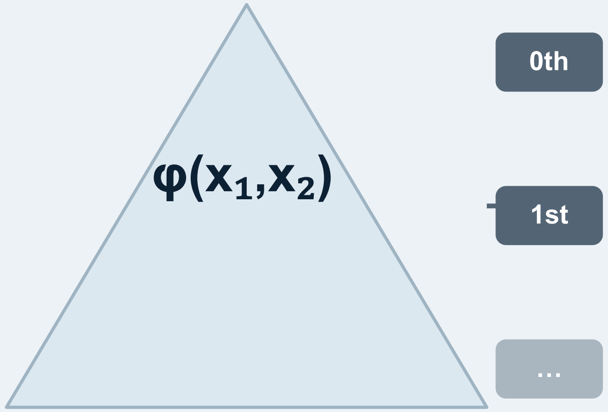
A dominant · symmetric　**V** antisymmetric　**T** antisymmetric

V、A、T 同时编码动量分配、螺旋度与 flavor/permutation 结构。

- **完整二维函数** 分辨三夸克之间的相关性与内部峰形。
- **卷积输入** hard-exclusive observables 需要函数，而不只是几个数。
- **端点结构** 高阶 power corrections 和因子化可靠性与 $x_i \to 0$ 直接相关。

为什么必须直接求完整二维分布?

传统局域矩方法

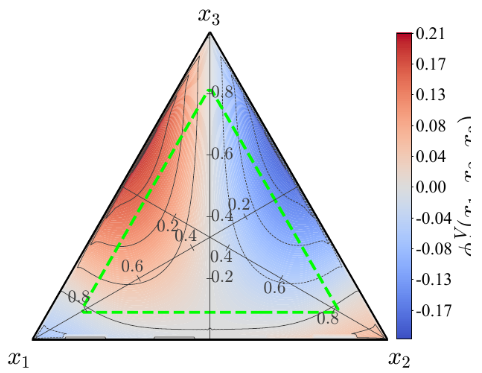


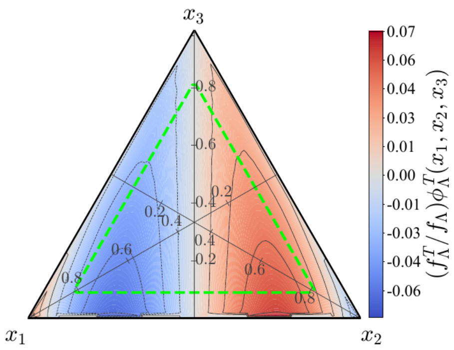
只得到少量积分约束
无法重建二维相关性与端点

“几个数” ≠ “完整函数”

Λ 的特殊性：零矩为零，但函数并不为零

$$\int [dx]\, \phi_\Lambda^A = 1, \qquad \int [dx]\, \phi_\Lambda^{V,T} = 0$$





V: sign-changing

T: sign-changing

V、T 在 $x_1 = x_2$ 上为零，但在非局域二维平面上清晰非零；局域 decay constant 无法独立表征它们。

Λ LCDA 如何把夸克偶极“翻译”为 hyperon EDM?

$$d_\Lambda(Q) = \sum_q \int [dx][dy]\ \Phi_\Lambda(x)\ \left[d_q H^{(q)}_{\mathrm{EDM}} + e\tilde{d}_q H^{(q)}_{\mathrm{CEDM}}\right]\ \Phi_{\bar{\Lambda}}(y)$$

Chen et al., PRL 136,051902(2026)

Λ LCDA Φ_Λ(x)
V, A, T: momentum + helicity

Quark CP dipoles
d_q → γ (EDM)
e d̃_q → g (CEDM)

→

Hard kernel H_CP
dipole vertex + hard-gluon exchange
perturbatively calculable

→

Double convolution
∫[dx] [dy]
sum over all momentum sharing

→

THEORY OUTPUT
d_Λ(Q)
EDM form factor

↔

EXPERIMENT
BESIII
Re / Im d_Λ(Q)
same Q

01
quark CP dipoles
d_q · e d̃_q

→

02
hard kernel H_CP
dipole vertex + hard-gluon exchange

→

03
Λ / Λ̄ LCDAs
V, A, T
momentum + helicity

→

04
double convolution
∫[dx][dy]
all momentum sharing

→

05
d_Λ(Q) ↔ BESIII
same finite Q
Re / Im response

LCDA 不是 CP 破坏的来源；它决定不同 flavor 的 QCD 传递系数和最终信号大小。

LCDA 形状会改变 flavor 权重与新物理约束

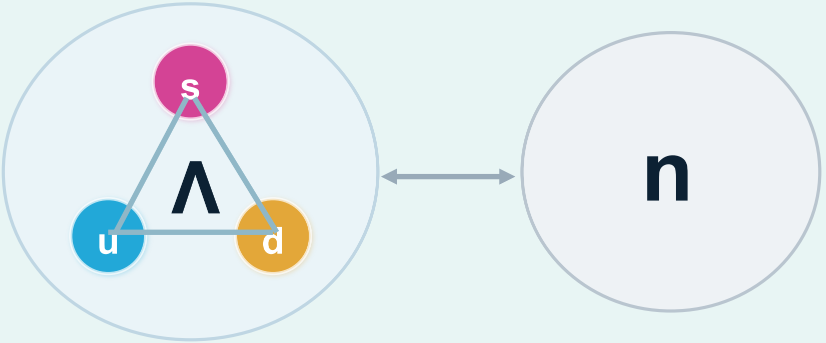
同一硬过程，不同 LCDA 输入

	QCD SR		lattice moments	
s-quark EDM coefficient	1.94×10^{-3}	→	5.29×10^{-4}	≈ 3.7×
s-quark CEDM coefficient	1.78×10^{-4}	→	6.21×10^{-5}	≈ 2.9×

Chen et al., PRL 136,051902(2026)

LCDA 是当前数值计算中的主导强子不确度最重要输入。

Λ EDM 与 neutron EDM 的互补性



s-CEDM sensitive

no $\tilde{d}_s$ term

example bound

$|\tilde{d}_s| \lesssim 1.4 \times 10^{-14}$ cm

LCDA 研究历史

Results @ Indirect (moments / priors) reconstruction
Results @ Direct x-dependent distribution

Light Meson

Analytic

Sum Rule
NPB 201 492 (1982)
ZPC 44 157 (1989)
PRD 54 2182 (1996)
NPB 529 323 (1998)
JHEP 05 004 (2006)
…

Model
PRD 66 094016 (2002)
PRD 84 033001 (2011)
PRD 88 034013 (2013)
PRD 104 016021(2021)
…

Global Fits
PRD 62 116002 (2000)
PRD 67 074012 (2003)
PLB 578 91 (2004)
PRD 83 054020 (2011)
PRD 102 074022 (2020)

DSE
PRL 110 132001 (2013)
PRL 111 092001 (2013)
PRD 90 014011 (2014)
PPNP 120 103883 (2021)
…

OPE Moments

Lattice OPE
PRD 74 074501 (2006)
PRD 92 014504 (2015)
[RQCD]PLB 774 91 (2017)
[RQCD] JHEP 08 065 (2019)
…

Pseudo
PRD 95 056020 (2017)
PRD 100 116011 (2019)
arXiv:2401.06858
…

Current Current
EPJC 78 217 (2018)
PRD 98 094507 (2018)
…

Full Distribution

LaMET
PRD 95 094514 (2017)
PRD 102 094519 (2020)
[LPC] PRL 127 062002 (2021)
[LPC] PRL 129 132001 (2022)
[BNL/ANL]PRD 106 074505 (2022)
[BNL/ANL] JHEP 07 211 (2024)
…

Heavy Meson

Model
PRD 55 272 (1997)
PRD 69 034014 (2004)
JHEP 07 154 (2018)
…

HQ-LaMET
PRD 102 011502 (2020)
[LPC]PRD 111 L111503 (2025)
[LPC]PRD 111 034503 (2025)
[LPC]2604.25802, 2605.10946
…

Light Baryon

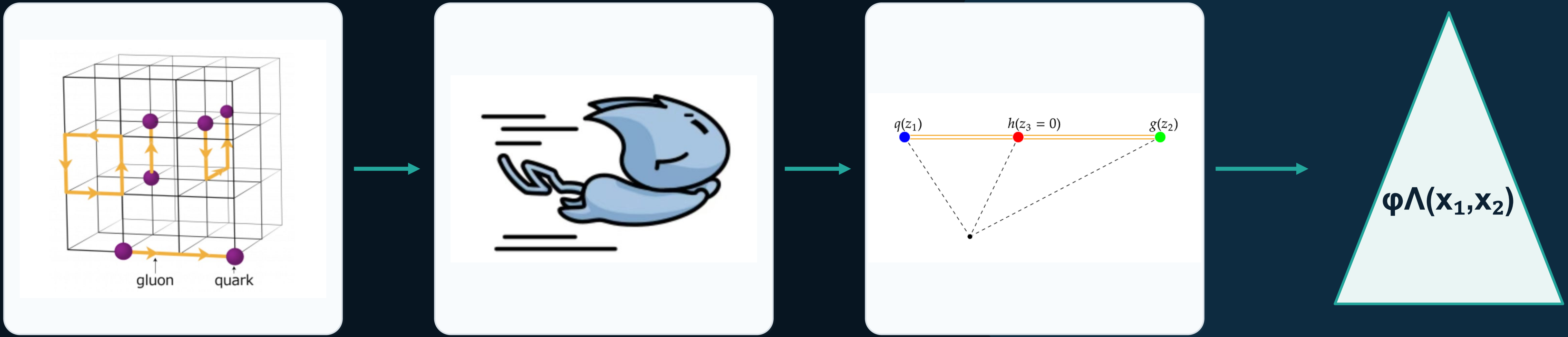
Sum Rule
NPB 279 785 (1987)
PRD 47 R3685 (1993)
…

Model
PRD 65 074011 (2002)
JHEP 11 191 (2013)
…

Lattice OPE
[QCDSF] PRL 101 112002 (2008)
[QCDSF] PRD79 034504 (2009)
[RQCD] EPJA 55 116 (2019)
[RQCD] PRD111 094517 (2025)
…

LaMET
[LPC] PRD 111 034510 (2025)
[LPC] PRD 112 114515 (2025)
…

如何从 Euclidean lattice 算到 light-cone structure?



Euclidean grid → large P^z boost → equal-time quasi-DA → physical LCDA

$$\phi_\Lambda = C \otimes \tilde{\phi}_\Lambda + \mathcal{O}(\Lambda_{\rm QCD}^2/(x_i P^z)^2)$$

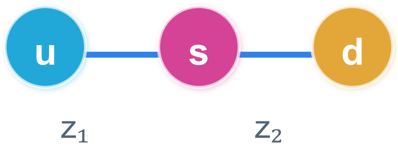
LaMET：用大动量下的等时空间关联替代不可直接计算的光锥关联，再通过微扰 matching 恢复物理 LCDA。

从 meson 到 baryon：不是简单复制

Baryon LCDA 的难点来自“二维 + 三夸克 + 多结构”。

01

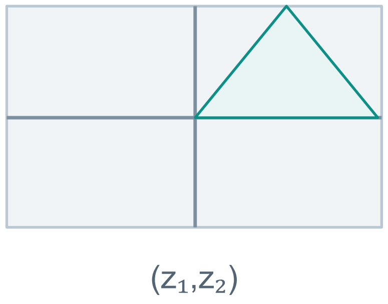
真正二维的非局域算符



两个独立空间分离 z_1、z_2；二维 Fourier transform；三个 valence quarks 的相关性不能降维。

02

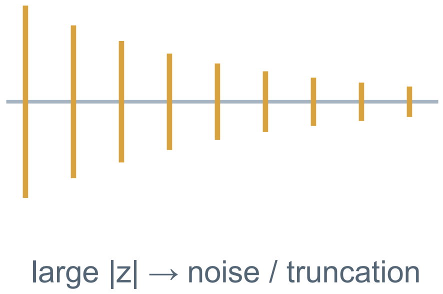
二维重整化与 matching



Wilson-line UV 发散依赖 $|z_1|$、$|z_2|$、$|z_1-z_2|$；需要在整个坐标平面上一致处理。

03

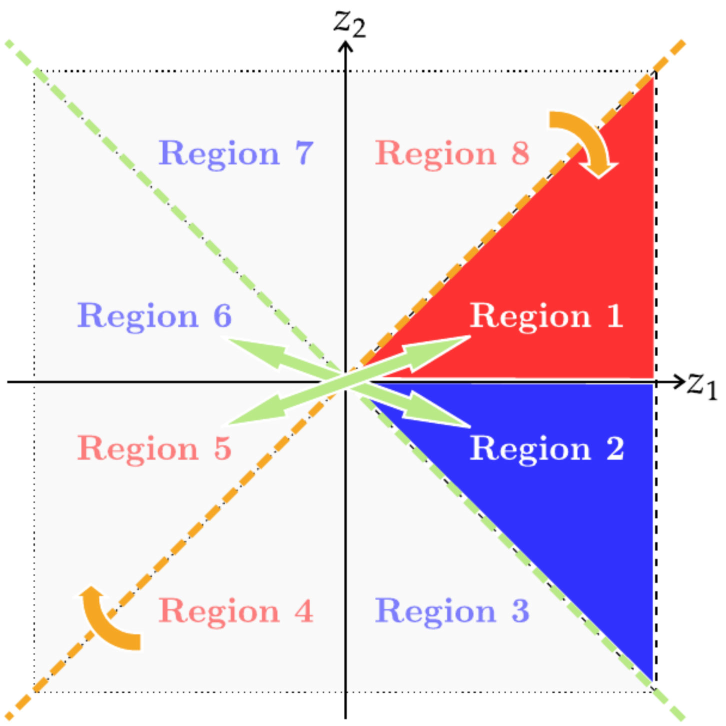
信号与大距离完成



boosted baryon 信噪比快速恶化；有限坐标范围会在二维 Fourier transform 中放大系统误差。

这三类问题决定了：baryon LCDA 需要一套专门的完整分析框架。

Λ 对称性：把完整坐标平面压缩到两个独立区域



轻夸克交换：$z_1 \leftrightarrow z_2$

$$\tilde{\Phi}^{A}_{\Lambda}(z_1, z_2) = +\tilde{\Phi}^{A}_{\Lambda}(z_2, z_1)$$

$$\tilde{\Phi}^{V,T}_{\Lambda}(z_1, z_2) = -\tilde{\Phi}^{V,T}_{\Lambda}(z_2, z_1)$$

$$\tilde{\Phi}^{X}_{\Lambda}(-z_1, -z_2) = \left[\tilde{\Phi}^{X}_{\Lambda}(z_1, z_2)\right]^*$$

- **A** symmetric
- **V, T** antisymmetric
- **Hermiticity** real momentum-space quasi-DAs

只需在 $z_1 > |z_2|$ 的独立四分之一区域分析，再用对称性重建整个平面。

FRAMEWORK

两篇文章：一条从形式到物理结果的完整链条

1. **Boosted 3-quark correlators**
2. **Hybrid renormalization**
3. **Large-λ completion**
4. **2D Fourier transform**
5. **One-loop matching**
6. **a, mπ, Pz physical limit**
7. **V, A, T LCDAs + phenom.**

Baryon Light-Cone Distribution Amplitudes from Lattice QCD: Formalism, Renormalization, Extrapolation, and Matching

(Lattice Parton Collaboration (LPC))

Companion article

Formalism · Renormalization Extrapolation · Matching

（LPC）arXiv:2606.30387

建立 baryon-LaMET 计算分析流程，并系统量化 end-to-end 误差来源。

Complete Access to Leading-Twist Λ-Baryon Light-Cone Distribution Amplitudes from Lattice QCD

(Lattice Parton Collaboration (LPC))

Letter

Complete physical V, A, T + phenomenology

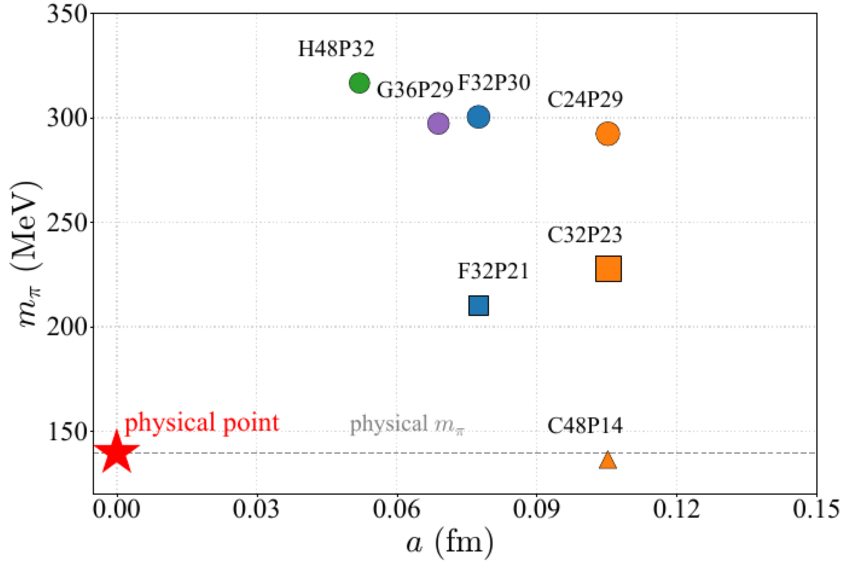
（LPC）arXiv:2606.29597

给出物理点二维 LCDAs、参数化，以及 form-factor / CP-sensitive 应用。

Lattice setup：覆盖 a、mπ 与 Pz 三个方向

CLQCD · Nf = 2+1

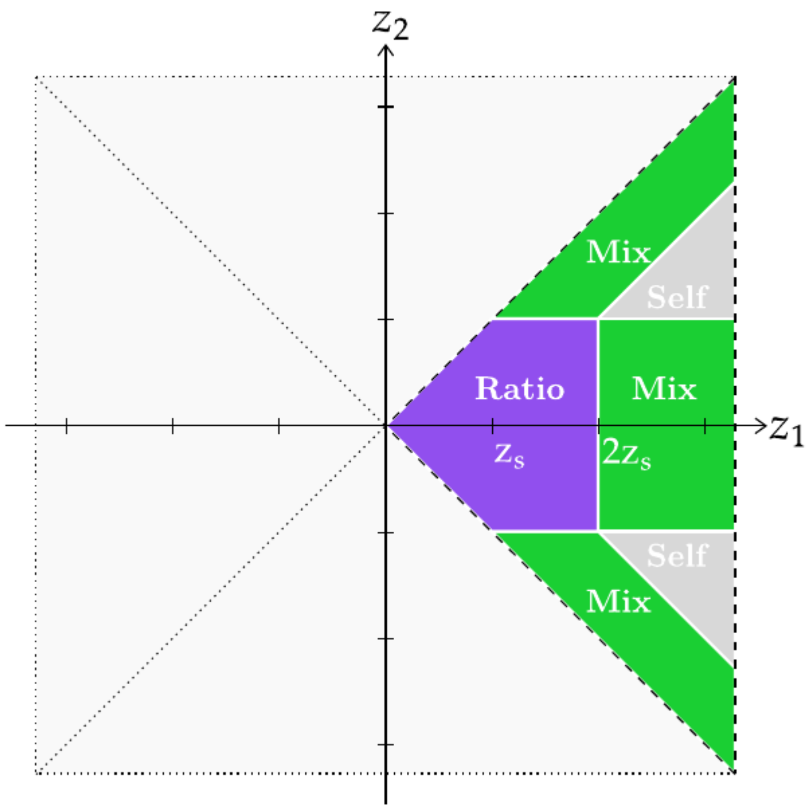
7	lattice ensembles
0.052–0.105 fm	lattice spacing a
136–317 MeV	pion mass mπ
Pz ≤ 3 GeV	boosted Λ momenta



（CLQCD）PRD 109 054507 （2024）

多格距、多 pion mass、多 momentum 为 continuum、physical-mass 与 infinite-momentum 极限提供 lever arm。

Hybrid renormalization：在二维坐标平面上分区处理



三种nonlocal距离划分

$|z_1|$ · $|z_2|$ · $|z_1 - z_2|$

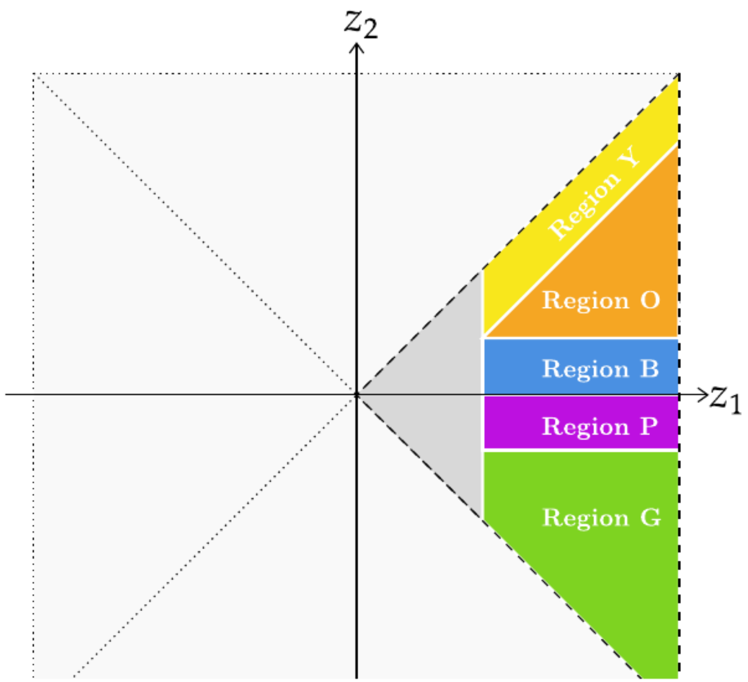
SHORT **Ratio prescription** 用 zero-momentum matrix elements 消除短距离 UV dependence。

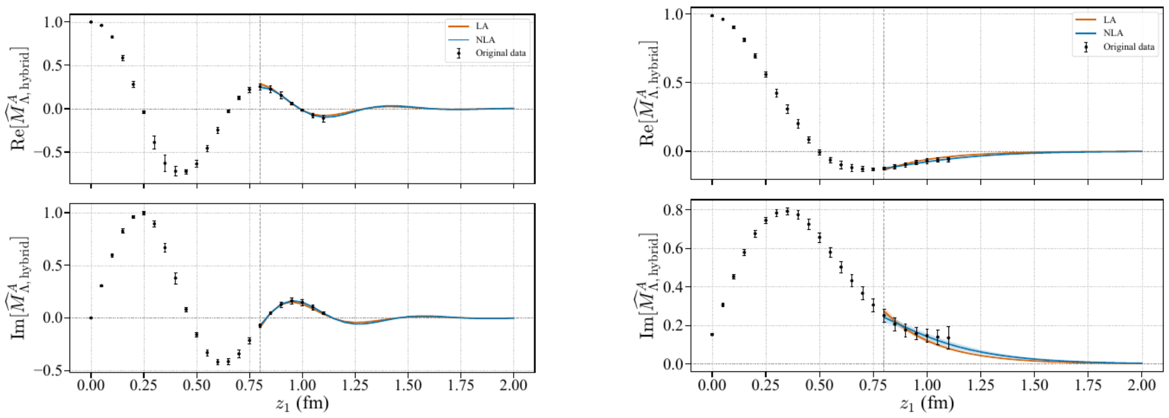
LONG **Self-renormalization** 长距离避免 ratio denominator 的红外污染。

MIX **Continuous mixed regions** 对长、短距离成分分别处理，并在边界保持连续。

不是“一个 renormalization factor 乘遍全平面”，而是依据物理距离自洽拼接。

Large-λ completion：让二维 Fourier transform 可控





(a) $z_1 - z_2 = 0,\ z_1 + z_2 \geq 0$

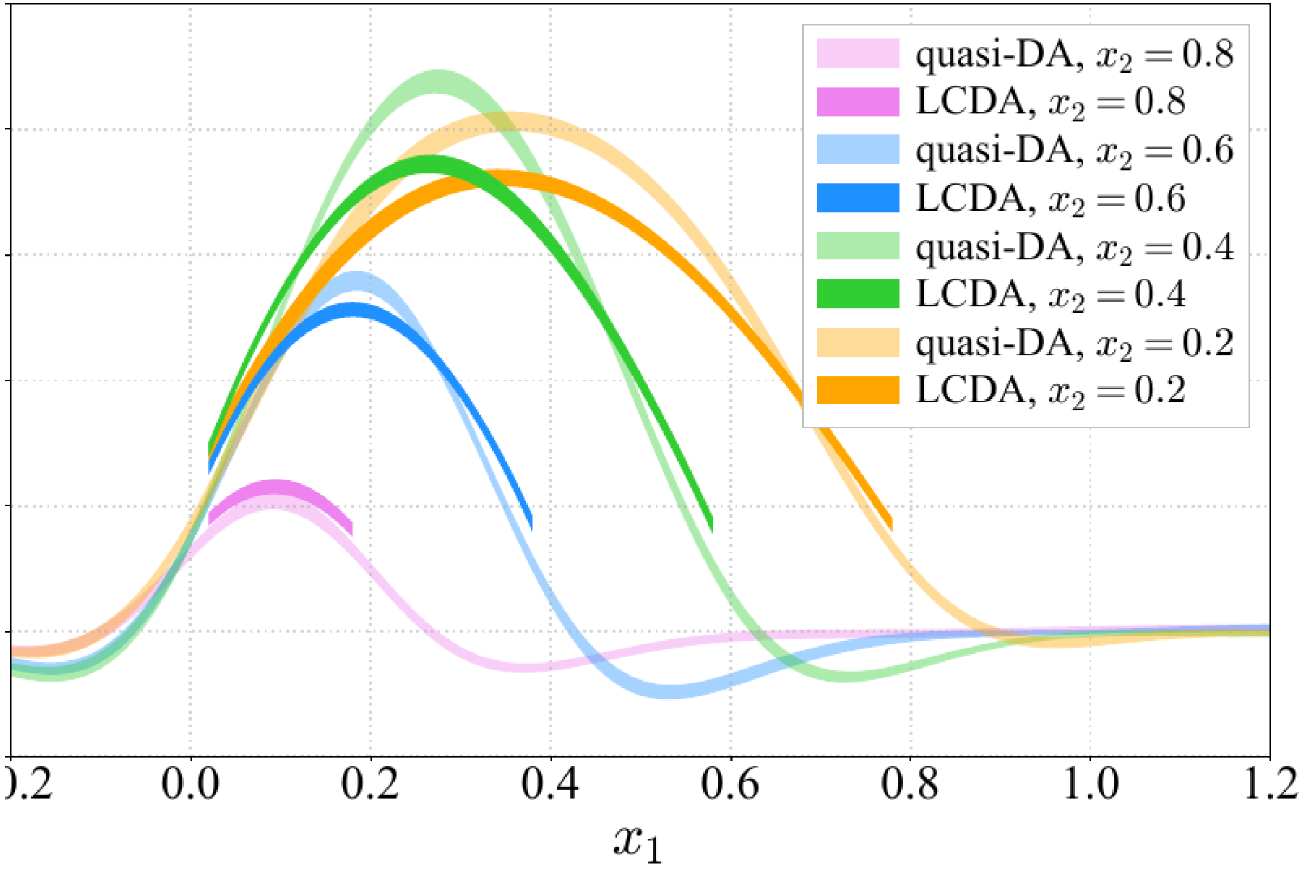
(b) $z_2 = 1$ grid unit, $z_1 \geq 0$

新的 Euclidean long-distance expansion *arXiv:2601.12189*

- 依据 $|z_1|$、$|z_2|$、$|z_1-z_2|$ 哪个进入大距离，为不同区域构造 baryon-specific ansätze。
- LA / NLA 稳定性差异纳入系统误差。
- 结果平滑延拓到有限格点数据之外。

有限坐标数据 → 物理约束的平滑完成 → 稳定的二维 momentum-space quasi-DA。

LaMET matching：改变的是形状，不是一个整体因子



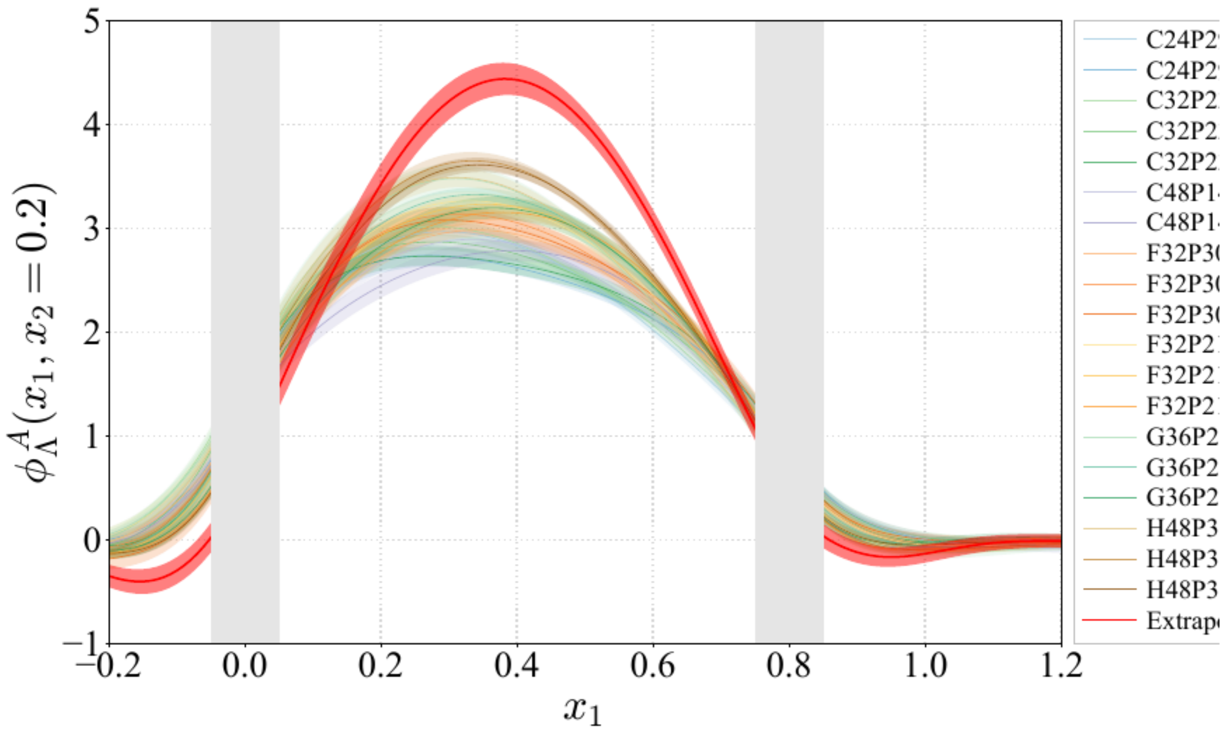
one-loop matching

$$\phi^X = C^X \otimes \tilde{\phi}^X$$

- 把 finite-P^z quasi-DA 转换为 light-cone LCDA
- x_1、x_2 依赖的 kernel 重新分配支撑与峰形
- hybrid counterterms 与 renormalization scheme 一致

visible, momentum-fraction-dependent modification

联合外推：continuum · physical pion mass · $P^z \longrightarrow \infty$



point-by-point in (x_1,x_2)

$$\phi_{a,m_\pi,P^z} = \phi_{\rm phys} + \frac{A}{(P^z)^2} + (m_\pi^2 - m_{\pi,{\rm phys}}^2)B + a^2[D_1 + (P^z)^2 D_2]$$

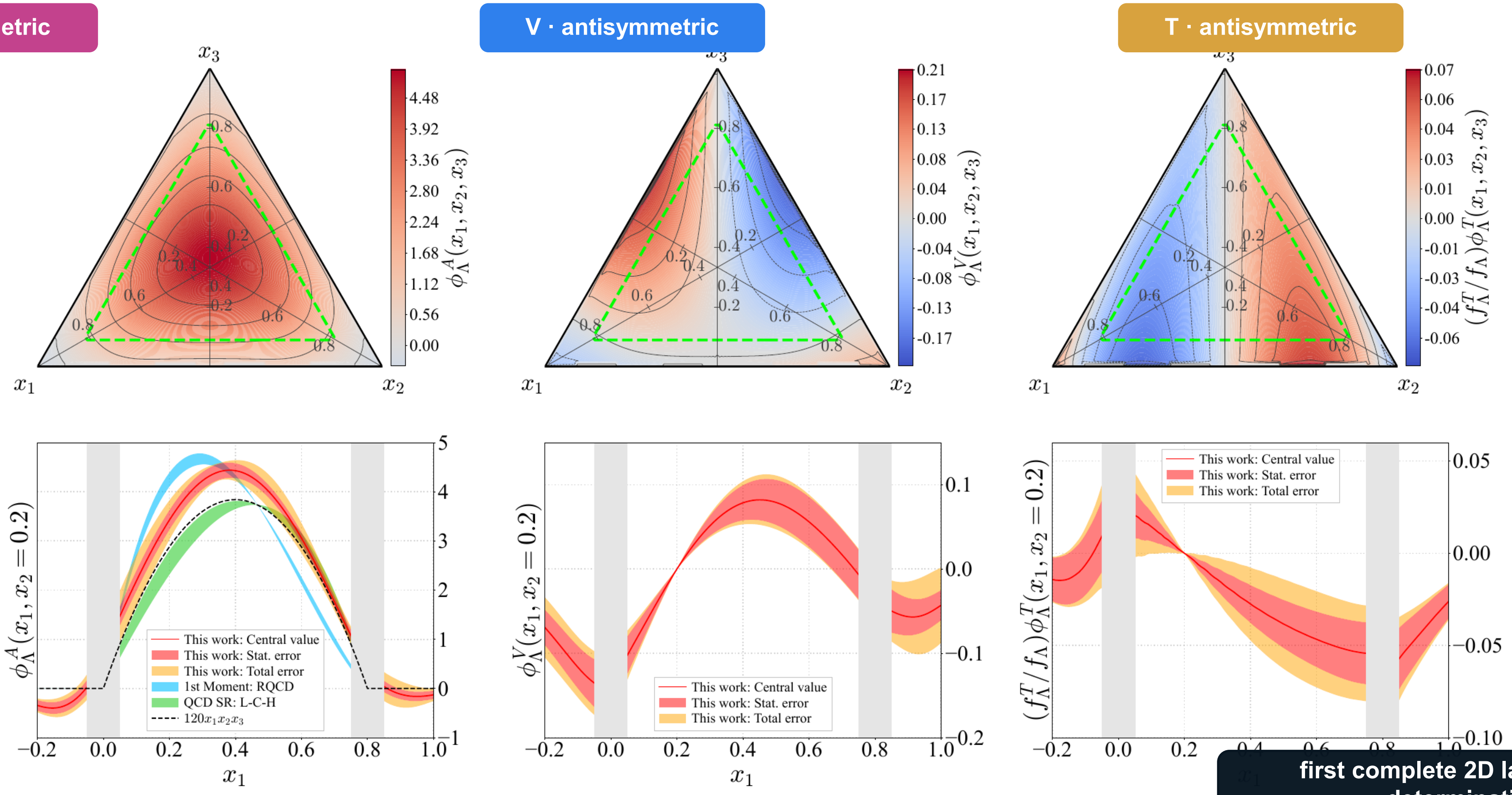
$1/(P^z)^2$ leading LaMET power correction

$(m_\pi)^2$ physical-pion-mass dependence

$a^2 + a^2 P_z^2$ static and boosted discretization

red band : physical-limit LCDA

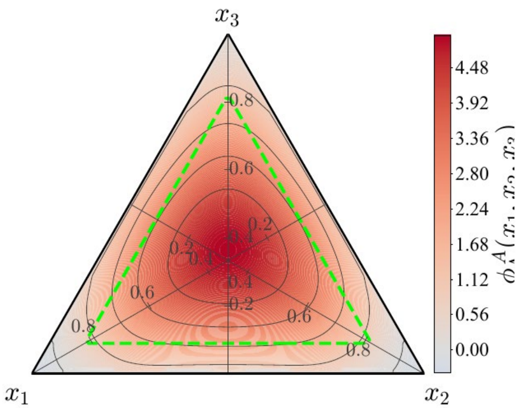
第一性原理获得完整的 Λ leading-twist V、A、T



first complete 2D lattice-QCD determination

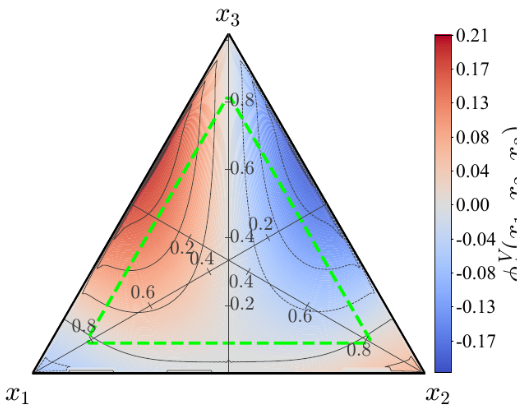
二维分布告诉我们什么?

A：主导且对称



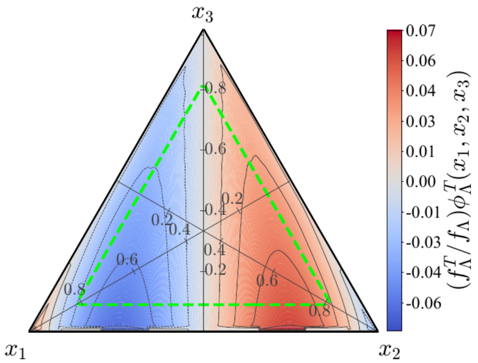
内部宽峰；峰形轻微向 x_3 方向偏移。
→ s 夸克携带的纵向动量份额略大。

V：反对称



跨 $x_1 = x_2$ 变号，并在对角线上为零。
→ 非局域轻夸克交换结构被直接解析。

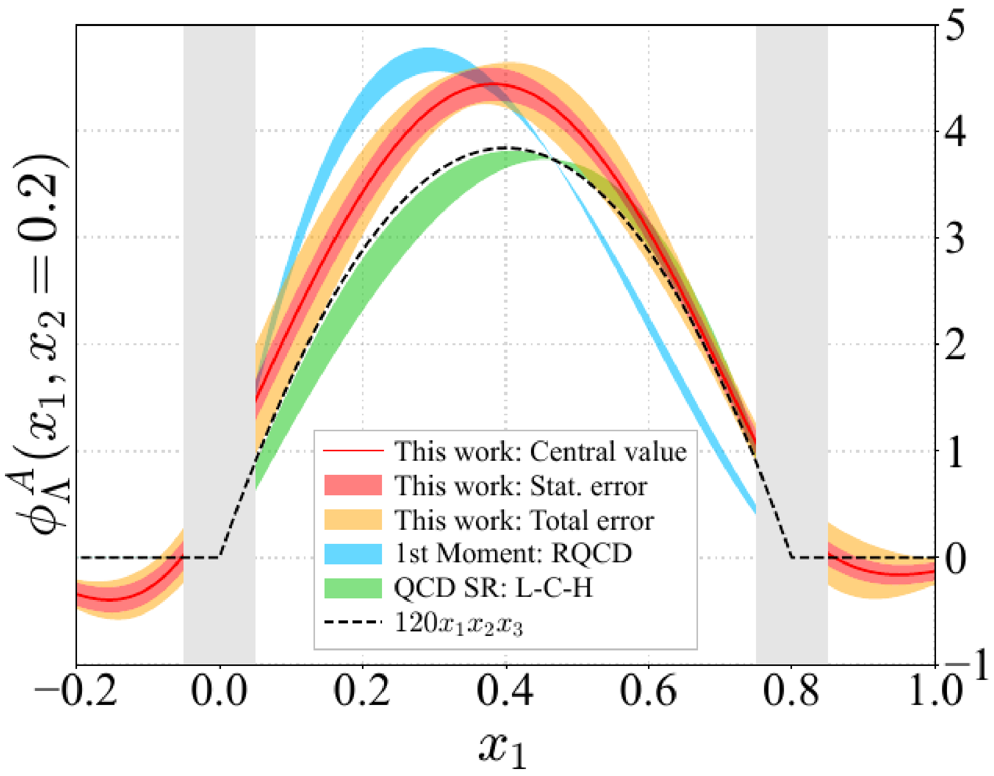
T：反对称



同样具有 sign-changing pattern，幅度较小但显著非零。
→ 超出 local-moment 能力范围。

结果不仅给出“有多大”，更首次在 momentum-fraction plane 中直接看见对称与反对称结构。

超越渐近形状与低阶矩：可观测量出现 O(10%) 改变



Λ Dirac form factor at Q^2 = 20 GeV²

	asymptotic	lattice LCDA	
LO	0.00425	→ 0.00371	12.7%
NLO	0.00913	→ 0.00806	11.7%

full 2D shape becomes a leading phenomenological input once the hard kernel is under control.

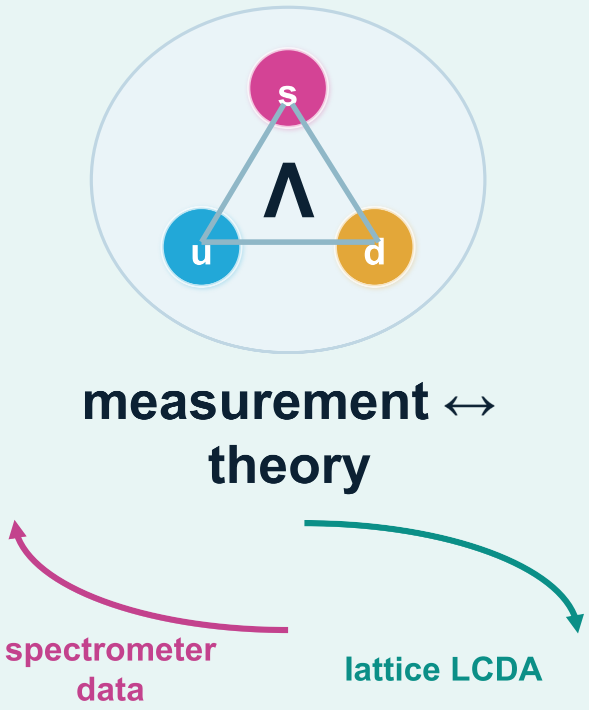
对超子–核子谱仪物理意味着什么?

time-like EM form factors

为高 Q^2 短距离 hard-scattering 部分提供第一性原理三夸克输入。

hyperon EDM / CP-odd FF

减少从 dΛ(Q) 到 quark EDM/CEDM 的强子映射不确定性。



极化与弱衰变 CP

为 baryonic amplitudes 与 CP asymmetries 的因子化分析提供结构输入。

octet flavor systematics

同一框架可推广到 p、n、Σ、Ξ，建立 strange/non-strange 对照。

最直接的近期用法：把文中给出的二维参数化接入 hyperon form-factor 与 EDM 分析。

三点总结

01

Λ 是连接奇异味结构、极化与 CP/EDM 的关键实验室

自分析弱衰变、精密 form factors 与 EDM 搜索使 Λ 成为谱仪物理中的高杠杆对象。

02

我们首次从格点 QCD 完整得到物理点 V、A、T 二维 LCDAs

完整流程包含二维 hybrid renormalization、large-λ completion、matching 与联合物理极限外推。

03

完整形状对可观测量和 BSM 解释是定量输入

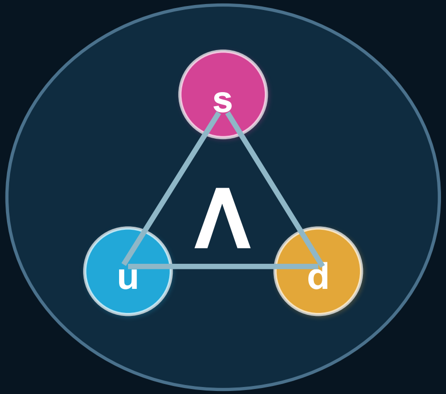
在 Λ form factor 中产生 O(10%) 效应，并显著影响 hyperon EDM 对 quark dipoles 的 flavor 权重。

谢谢 · Thank you

Discussion

junhua@scnu.edu.cn

Lattice Parton Collaboration



complete 2D Λ light-cone structure

Complete Access to Leading-Twist Λ-Baryon Light-Cone Distribution Amplitudes from Lattice QCD
(Lattice Parton Collaboration (LPC))

Mu-Hua Zhang,[1] Haoyang Bai,[2,3] Min-Huan Chu,[4] Jun Hua,[5,6,*] Xiangdong Ji,[7] Xiangyu Jiang,[8] Jian Liang,[5,6] Cai-Dian Lü,[2,3] Andreas Schäfer,[9] Wei Wang,[10,11,†] Yi-Bo Yang,[8,12,13,14] Jian-Hui Zhang,[15] Jia-Lu Zhang,[1] and Qi-An Zhang[16]

arXiv:2606.29597

Complete Access to Leading-Twist Λ-Baryon LCDAs

physical V, A, T + phenomenology

Baryon Light-Cone Distribution Amplitudes from Lattice QCD: Formalism, Renormalization, Extrapolation, and Matching
(Lattice Parton Collaboration (LPC))

Mu-Hua Zhang,[1] Haoyang Bai,[2,3] Min-Huan Chu,[4] Jun Hua,[5,6,*] Xiangdong Ji,[7] Xiangyu Jiang,[8] Jian Liang,[5,6] Cai-Dian Lü,[2,3] Andreas Schäfer,[9] Wei Wang,[10,11,†] Yi-Bo Yang,[8,12,13,14] Jian-Hui Zhang,[15] Jia-Lu Zhang,[1] and Qi-An Zhang[16]

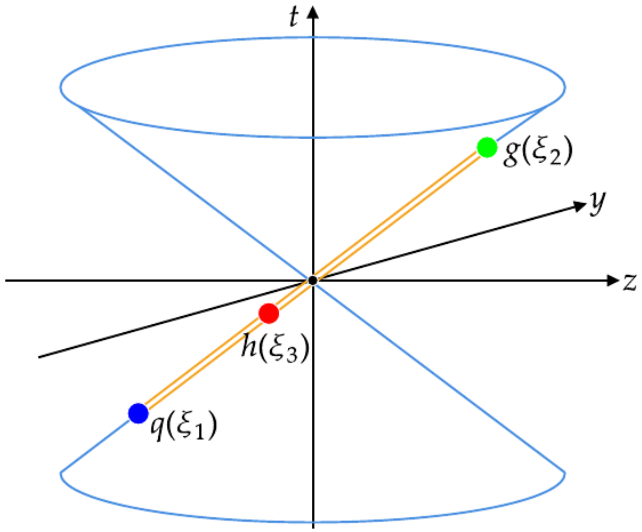
arXiv:2606.30387

Formalism · Renormalization · Extrapolation · Matching

complete baryon-LaMET infrastructure

Backup slides follow

定义、支撑区域与归一化



$$\phi_\Lambda^X(x_1,x_2;\mu)=(P^+)^2\int\frac{d\xi_1}{2\pi}\frac{d\xi_2}{2\pi}e^{i(x_1\xi_1+x_2\xi_2)P^+}\Phi_\Lambda^X(\xi_1P^+,\xi_2P^+;\mu)$$

$0 \le x_1, x_2, x_3 \le 1, \quad x_1 + x_2 + x_3 = 1$

$$\int[dx]\,\phi_\Lambda^A=1,\qquad\int[dx]\,\phi_\Lambda^{V,T}=0$$

A has a nonzero local limit; V and T vanish locally and use the local A matrix element as the reference normalization.

X = V, A, T

推荐的二维参数化（phenomenology input)

TABLE II. Recommended second-order parameterization of the lattice-determined Λ LCDAs. The coefficients $\phi_{\Lambda,nm}$ determine the A and V amplitudes, while $\widetilde{\pi}_{\Lambda,nm}$ determine the T amplitude. To suppress the impact of endpoint-enhanced higher-power corrections, the fit is restricted to the region $x_{1,2,3} \geq 0.1$.

$\phi_{\Lambda,10}$	$\phi_{\Lambda,11}$	$\phi_{\Lambda,20}$	$\phi_{\Lambda,21}$	$\phi_{\Lambda,22}$	$\widetilde{\pi}_{\Lambda,10}$	$\widetilde{\pi}_{\Lambda,21}$
0.0343(12)	0.00543(40)	0.0012(14)	−0.0267(18)	−0.0087(14)	0.00750(10)	0.00043(14)

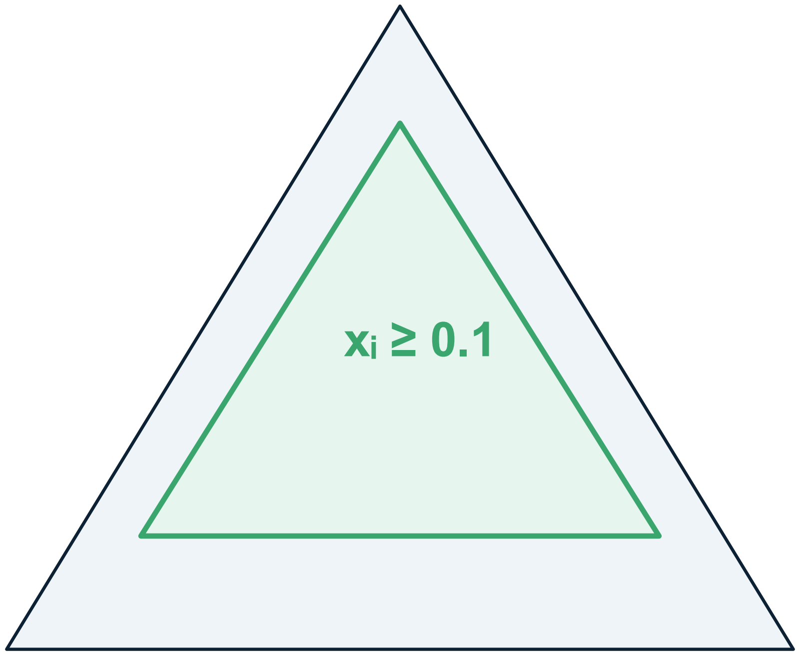
Recommended default: second-order conformal polynomial fit

fit region $x_1, x_2, x_3 \geq 0.1$

purpose captures resolved 2D shape without weakly constrained higher components

normalization absorb residual $\varphi\Lambda$,0 into $f\Lambda$ / $\varphi\Lambda$,0 for applications

系统误差与 LaMET reliable region



endpoint-enhanced
power corrections

Error budget

- renormalization / matching scale
- large-λ extrapolation
- a, m_π, P^z physical-limit extrapolation
- statistics propagated through full pipeline

central values are quoted with statistical and total uncertainties point-by-point in (x_1,x_2)

EDM interpretation：适用域与未计入修正

$$d_\Lambda(Q) \sim Q^{-4}\, \Phi_\Lambda \otimes H_{\mathrm{CP}} \otimes \Phi_{\bar{\Lambda}}$$

KINEMATICS BESIII probes Q = M(J/ψ) ≈ 3.1 GeV; this is a finite-Q EDM form factor, not dΛ(0).

PERTURBATIVE Current example uses leading-power / leading-order hard kernel; higher-order αs is not included.

TWIST Higher-twist contributions may be relevant at this moderate scale and require future study.

Use the lattice LCDA to reduce hadronic uncertainty — not to erase the remaining perturbative and power-correction systematics.